

アルミ - 水反応の衛星推進系への適用（室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書2015）

著者	小野寺 英之，大堀 英雄，後藤 翔，今村 卓哉，齋藤 真之，今井 良二，杉岡 正敏，東野 和幸
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2015
ページ	20-28
発行年	2016-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009155

○小野寺 英之（航空宇宙総合工学コース 博士前期 2 年）

大堀 英雄（航空宇宙総合工学コース 博士前期 1 年）

後藤 翔（航空宇宙総合工学コース 博士前期 1 年）

今村 卓哉（航空宇宙システム工学コース 学部 4 年）

齋藤 真之（航空宇宙システム工学コース 学部 4 年）

今井 良二（航空宇宙システム工学ユニット 教授）

杉岡 正敏（航空宇宙機システム研究センター 名誉教授）

東野 和幸（航空宇宙機システム研究センター 教授）

1. 背景

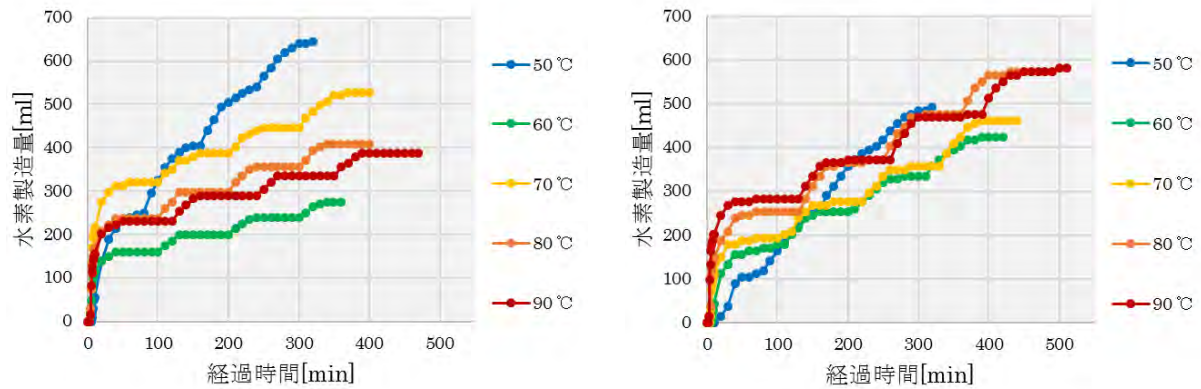
現在、宇宙機推進システムの燃料として主にヒドラジンが使用されている。ヒドラジンは高比推力で着火性に優れる燃料であるが毒性を有するため、現在、代替燃料を用いた推進システムの開発がすすめられている。航空宇宙機システム研究センターでは、アルミと水の反応から得られる水素を宇宙機推進システムに適用する研究をこれまでに実施してきた。本システムではアルミタンクから取り出したアルミと水タンクから取り出した水を反応器で混合して高圧水素製造反応を起こし、水素をスラスタに供給する構成としている。本システムでの反応物である水およびアルミ、反応生成物の水素および水酸化アルミはいずれも毒性を有さないため、次世代の推進系への適用が有望である。

昨年度までに、(1)アルミ合金（Al-Zn）において、粒径，組成が水素製造特性および温度による水素製造制御性の確認，(2)水素製造循環（水酸化アルミニウムからのアルミの再生）を成立させるのに必要な酸化アルミニウムの窒化の確認，(3)水タンクにおける液体捕捉機構の検討，を実施してきた。上記に引き続き本年度は、(1)アルミ合金（Al-Sn）における温度による水素製造制御性の確認，(2)水素製造循環における酸化アルミニウムの窒化の実証，(3)微小重力環境下における水タンク液体捕捉機構の考案，検証，(4)微小重力環境下における反応槽内部の流動挙動，気液分離機構の検証，を実施した。本報では本年度の研究成果についてまとめた。

2. 内容

2-1. 水素製造制御法[1][2]

温度による反応制御可否の確認のため、電気ヒータによりある設定温度まで上昇させて無攪拌もしくは攪拌を行なって水素を生成したのち、電気ヒータを遮断して自然空冷により冷却し、反応の継続および停止の確認を行った。図 1 に設定温度と水素製造量の時間変化を示す。(a)は常時攪拌を行わないもの（常時無攪拌），(b)は加熱時に攪拌を行い、冷却時に攪拌を行わない場合の結果を示す。図 1 において、60℃以上で水素製造量の変化量が小さい部分が冷却時であり、その他の時間では各設定温度に加熱されている。これらの結果より、60℃以上で温度による水素製造の制御が可能であることが分かる。一方 50℃においては冷却時においても水素製造が継続し、制御性が良好でないことが分かる。



(a)常時無攪拌 (b)攪拌（加熱時）－無攪拌（冷却時）

図1 設定温度と水素製造量の時間変化

2-2. Al-水推進システム検討・軌道計算[1]

Al-水推進システムの衛星推進系への適用例として、国際宇宙ステーション（ISS）から放出される小型衛星の軌道上昇（アセント）に対する成立性を検討した。図2にAl-水推進システムの概要を示す。このシステムでは球状の反応容器の中にAl粉末と水を充填し、Al-水反応から製造された水素をノズルから cold gas として噴射する。反応層で生成される水素気泡を分離、回収させる際、微小重力環境下での特有な気液二相流挙動を考慮する必要がある。図2には、反応槽壁面の濡れ性を向上させ、気泡を中心部に回収、合体させ、中心部から水素ガスを選択的に取り出す方法であり、ガス取り出しチューブには、水素ガスのみ透過する選択透過膜の適用を考えている。

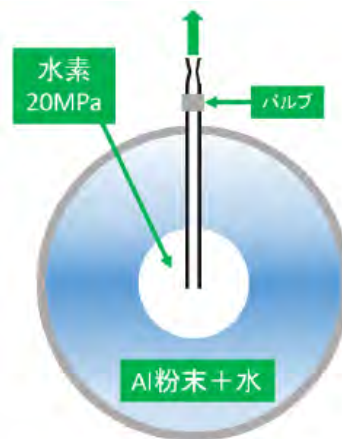


図2 Al-水推進システム

このシステムを用いて、高度 400 km の円軌道を周回する ISS から重量 50 kg の小型衛星を放出し、より高い円軌道に投入することを想定する。反応容器内の初期圧力は 20 MPa とした場合の高軌道への遷移プロセスを以下に記す。

- ① ISS から小型衛星を放出し、ISS から十分に離れたところで Al-水反応を開始する。反応容器内の圧力が 20 MPa から 19 MPa に下がるまで水素を噴射させ、遷移軌道に移行させる。遷移軌道上では次の水素噴射までに反応容器内の圧力を 20 MPa まで上昇させておく。
- ② 遷移軌道の遠地点で再び水素を噴射し、新たな周回円軌道に投入させる。

③ 新たな周回円軌道を半周した後，再び反応容器内の圧力が 20 MPa から 19 MPa に下がるまで水素を噴射させ，遷移軌道に移行する．遷移軌道上では次の水素噴射までに反応容器内の圧力を 20 MPa まで上昇させておく．

④ ②から③を繰り返す

水素ガスコールドガスジェットの諸元として，ノズルのスロート直径 0.1 mm，膨張比 150，反応容器圧力を 19MPa として推力，比推力の理論値は 258 mN，305 s となった．さらに反応容器の材質を Ti-6Al-4V とし，本材料の耐力を考慮して肉厚および重量を確定した．表 1 に反応容器体積と推進システム全重量，全増速量，高度 400 km の周回円軌道から投入可能な円軌道の関係を示す．

表 1 反応容器容量とシステム重量，全増速量，および遷移高度の関係

反応容器体積[L]	1	2	4	8	16
推進システム重量[kg]	1.41	2.82	5.65	11.3	22.6
全増速量[m/s]	3.96	7.92	15.8	31.8	63.7
遷移後の周回円軌道[km]	404.6	409.3	418.7	437.5	475.7

人工衛星の大気突入までの時間と軌道高度の関係を，大気抵抗を考慮した衛星の軌道解析により調査した．図 3 に解析結果を示す[3]．大気突入までの時間つまり衛星寿命が，軌道高度を 400 km から 420 km まで上昇させた場合 1.5 倍に，440 km まで上昇させた場合は 2 倍以上になることが分かる．上述のように，本 AI-水推進系を小型衛星の高軌道化に用いた場合，衛星寿命を延長できる可能性があることが分かる．

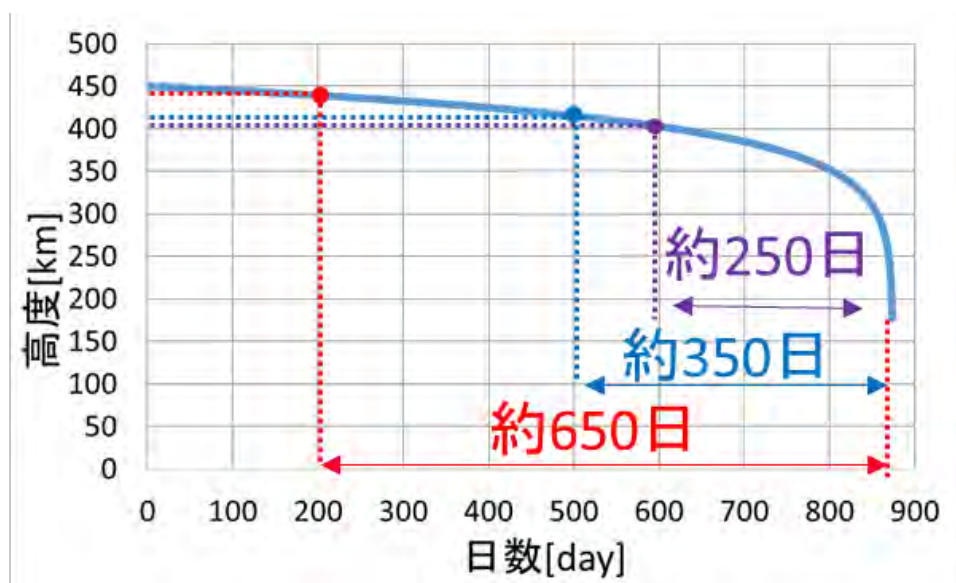


図 3 初期高度と大気突入までの日数の関係

2－3. AI/水系反応における水素製造循環に関する検討[6]

AI/水反応では水酸化アルミニウム $\text{Al}(\text{OH})_3$ が副生される．水酸化アルミニウムは推力寄与せずに蓄積されるため，宇宙機のシステム重量はヒドラジンを用いた場合と比べて大きくなると予想された．そこで，本研究では副生される $\text{Al}(\text{OH})_3$ を分解して AI に戻し，再び水素を取り出す水素製造循環の構築を目的としている．すなわち，AI/水反応における水素製造循環系を構築し，AI

を再利用することで Al/水系の反応をサイクル化することができれば、Al と水の搭載量を最小限に抑えながら、多量の水素を製造することができ、推進システムの軽量化及び長期使用が可能となる[4-6].

Al(OH)₃ は加熱分解により酸化アルミニウム(Al₂O₃)に変化するが、Al₂O₃ を直接 Al と酸素に分解することは極めて困難である. そこで、水素製造循環を宇宙機内で構築するため(1), (2)式に表すように、Al₂O₃ の Al への分解が比較的容易な窒化アルミニウム(AIN)に一旦変換してから分解する方が有利である. 宇宙機内では Al₂O₃ の AIN への変換反応を、より低温で進行させる必要がある. そのために、炭素には活性炭(AC)を用い、さらに鉄粉(Fe)を添加した条件で AIN 製造に向けた基礎的検討を行った.



AlN は Al₂O₃ と炭素の粉末状混合物を窒素雰囲気中において 1550 °C 以上での還元窒化により得る製造法が知られている[7]. しかし、宇宙機内での AlN 製造反応を考慮すると、できるだけ低温での製造が望まれる. 本報では試料に γAl₂O₃, AC, Fe の混合物を用い 1280 °C にて実験時間(2, 6, 10 時間)で維持するアルミナの窒化実験について報告する. 図 4 に実験装置概略図・試料及び装置の外観を示す. 実験装置には管状電気炉と耐熱管を用いた. 試料として γAl₂O₃ 1.8 g, AC 3.24 g 及び Fe 0.36 g を混合した合計 5.4 g のうち 1.2 g を磁製ボートに載せ耐熱管内に配置した. 実験装置全体に窒素を 20 ml/min で流通させ、実験温度で維持した. 使用しなかった残りの試料は実験前後の比較用サンプルとして保存した. AlN 生成の確認法としては、実験後磁製ボートの外観観察および試料の結晶構造を XRD 分析により評価した.

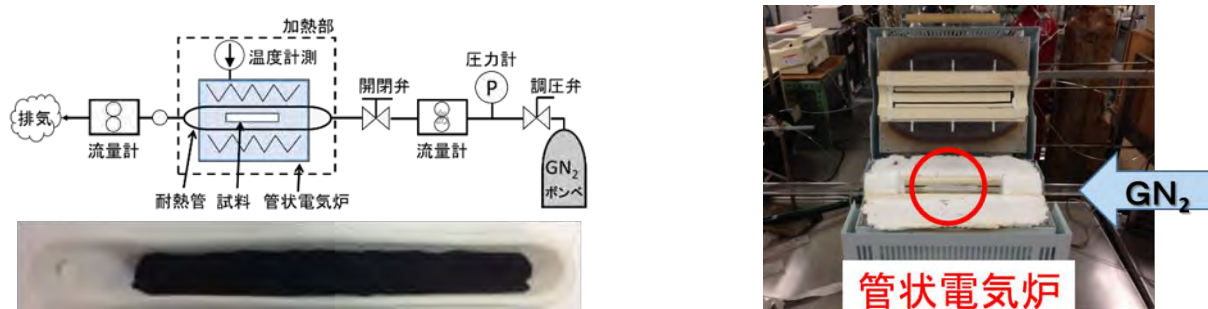


図 4 実験装置概略図・試料及び装置

窒化実験前の磁製ボートの外観を図 5 (a)に示し、窒化実験終了後の磁製ボートの外観を図 5 (b), (c), (d)に示す.

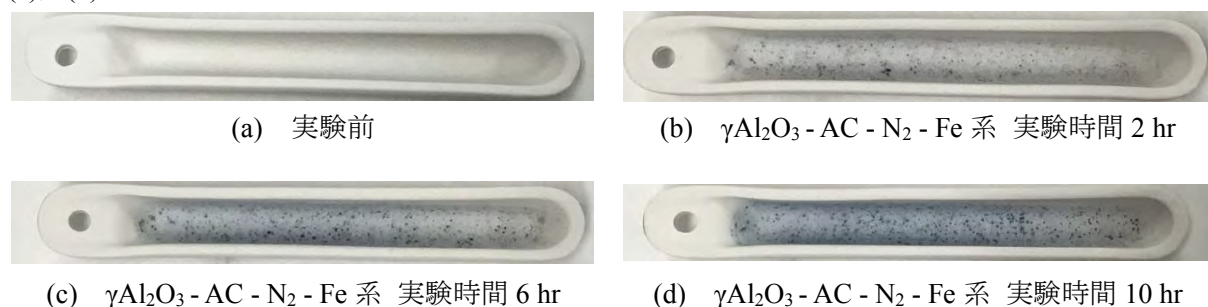


図 5 窒化実験前後の磁製ボートの外観比較

この結果、実験後の磁製ボート内壁に青色の着色が観察された。なお、実験前に行ったブランクテストにおいて、青色の着色は(1)式で必要な3種類の反応物(Al_2O_3 , C, N_2)の存在下で生じることを観察している。また、一般に AlN はOとC原子を含むと青味を帯びると報告されていることから[8]、変色は AlN 生成反応の進行を示唆し、試料の $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ は AlN 及び反応の中間物質(AlON 等)に変化したことが考えられる。さらに、同じ実験温度でも実験時間を長くした条件の方が磁製ボートは濃い青色に変化することがわかった。

$\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ -AC- N_2 -Fe系の試料に対しXRD分析を実施した。XRD分析結果を図6に示す。実験温度において6時間及び10時間維持した後の試料では AlN のピークを確認することができた。2時間維持後の試料では AlN のピークを明確には確認することはできなかった。一方、 $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ -AC- N_2 系で10時間維持した後の試料では AlN のピークを一部確認できた。また、図5および図6より磁製ボート内の青色の変色が濃いほどXRD分析において AlN のピークが明確に現れた。また、Feを添加しない条件の試料は1280℃の温度を10時間維持した場合でも AlN のピークは一部しか確認できなかった。Feはアンモニア合成反応において窒素を活性化させる触媒として用いられているので、本実験においてもFeは窒素を活性化する触媒として作用し、 $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ の窒化に大きく寄与したと考えられる。今後は他の金属添加物等を用いた反応条件で実験を行い、さらなる低温度下での AlN 製造を試みる。

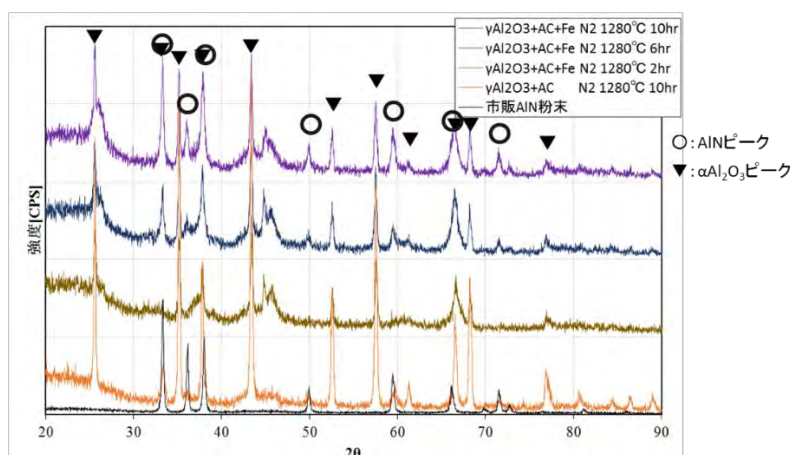


図6 各実験条件におけるXRD分析結果

2-4. 水貯蔵タンクの液体捕捉機構[9]

2-4-1. はじめに

本章では、Al/水反応推進系の構成要素の一つである水タンクにおける、液体捕捉機構の研究開発結果について述べる。微小重力下では、タンク内の気液界面が大きく湾曲する。これは微小重力下で表面張力が顕著となるためである。これにより、アレッジ(タンク内のガス部分)は液出入り口に接近し、液を流出する際にガスを巻き込みやすくなる。また、加速度方向が定まっていないため液を液出入り口に、ガスをガス出入口に保持することができない。そのため、推薬タンクから推薬のみをスラストに供給するには、推薬タンク内にブラダやダイアフラム等の隔壁を有するものおよび表面張力を利用したものが有効である[10]。本研究では可動部がなく、長期ミッションに適している表面張力タンクを検討している。しかし、水はぬれ性が非常に悪く、表面張力により液体を駆動するのが困難である。そこで、水のぬれ性を向上させる方法としてシリコーティングを試み、表面張力による液体捕捉機構に水の適用を可能とすることを目的とした。

2-4-2. 実験概要

本研究では微小重力下における水の液体捕捉を可能とするために以下の実験項目を設定した。

(1) シリカコーティング

本実験ではタンク内の液体挙動を観察することが目的のため透過性のあるアクリル樹脂を使用した。そこで、アクリルの板に常温で親水性向上が見込めるシリカコーティングを施し、CCD顕微鏡と画像処理ソフト ImageJ を用いて、水の接触角を計測した。

(2) 落下塔を利用した微小重力実験

本実験では(株)植松電機が所有する微小重力実験塔「COSMOTORRE」にて、シリカコーティングを施した供試体を用いて、水の液体挙動を観察した。

2-4-3. 実験手順・実験装置

本実験では、(有)エクスシアのコーティング剤(液種:SSN-SD50)と親水剤を用いた。初めにアルコールを用いて塗布面の洗浄を行い、コーティング面の水分が無くなるまで乾燥した。次にエアーコンプレッサーを用いてコート剤を塗布し、180秒静置した後、クロスでコート剤を拭き取った。拭き取り後、上記と同様の手順で上塗り乾燥を行い、最後に親水剤をコーティング面とクロスに吹き付け、均一に塗りのばした後、40分間インキュベータ(25度)の中で転化した。CCD顕微鏡により液滴の画像を取得し、画像処理ソフト ImageJ で接触角を計測した。

本研究では(株)植松電機が所有する COSMOTORRE を用いて微小重力を形成した。用いた落下塔は自由落下距離が約 40 m、微小重力時間が 2.5 秒前後、微小重力の質が $10^{-3}G$ 程度である。落下させるカプセル内部に試験液入りの供試体、高速度カメラ(機種:GoPro HERO4)、照明、バッテリーを配置し、カプセルを落下させた。このときの液体挙動を 120 fps で撮影した。

実験条件を表 2、本実験で使ったタンク、ベーン(本実験の基準となるベーン①)を図 7、図 8 に示す。本実験ではベーンの装着角度や種類「①のベーンを基準に幅(②)、枚数(③)、形状(④)を変更した」、コーティング条件、タンク容量比、試験液を変えて実験を実施した。

2-4-4. 実験結果と考察

2-4-4-1. シリカコーティングについての実験結果と考察

前節と同様の手順でアクリル板にシリカコーティングを施すことにより、水の静的接触角が約 70 度から約 4 度となった。これはヒドラジン(平均 3.45 度)と同等程度の接触角であり[11]、大幅にぬれ性を改善することができた。

2-4-4-2. 落下塔を利用した微小重力実験についての実験結果と考察

図 9 に条件(c)、(h)の実験結果を示す。条件(c)では、水が液体出口付近に集まる様子を観察できた。一方、条件(h)では、微小重力の前後でほとんど液面に変化がなかった。この結果より、水のぬれ性を改善することにより、水を液体出口まで捕捉することが可能であることが確認できた。また、条件(c)と 10 秒落下塔で実施された実験結果[12]を比較するとほぼ同等の駆動速度で液体を捕捉することが確認できた。この結果より、シリカコーティングを施すことにより、水をぬれ性の良いシリコン油とほぼ同等のぬれ性に改善することができたと言える。

表 2 実験条件

実験条件	装着ベーン	ベーン装着角度(deg)	コーティング条件		タンク容量比(%)	液体
			タンク	ベーン		
(a)	①	90	あり	あり	16	水
(b)	①	45	あり	あり	32	水
(c)	①	90	あり	あり	32	水
(d)	①	45	あり	なし	32	水
(e)	①	90	あり	なし	32	水
(f)	①	45	なし	あり	32	水
(g)	①	90	なし	あり	32	水
(h)	①	90	なし	なし	32	水
(i)	①	90	あり	あり	50	水
(j)	②	90	あり	あり	16	水
(k)	②	45	あり	あり	32	水
(l)	②	90	あり	あり	32	水
(m)	②	90	あり	あり	50	水
(n)	③	90	なし	なし	32	シリコーン油
(o)	④	90	あり	あり	32	水

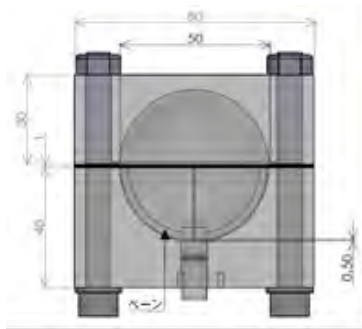


図 7 タンク詳細

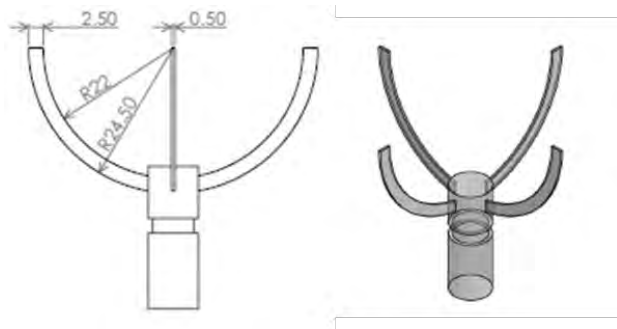
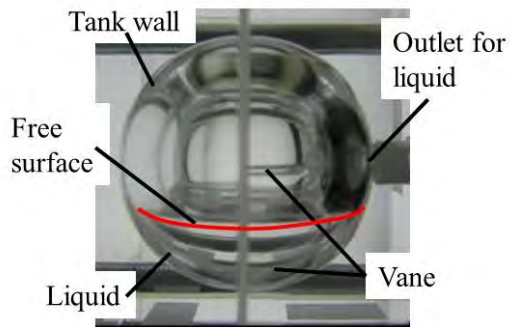
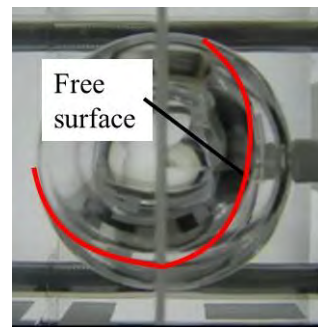


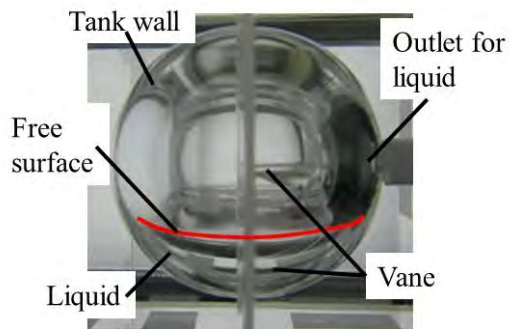
図 8 ベーン詳細



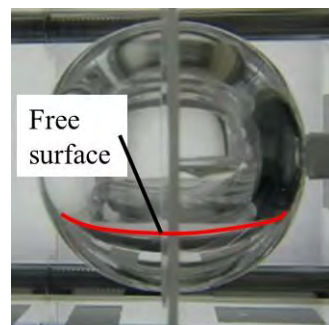
地上重力環境（実験条件（c））



微小重力環境(2.3 秒後, 実験条件（c））



地上重力環境（実験条件（h））



微小重力環境(2.3 秒後, 実験条件（h））

図 9 コーティングの有無による液体挙動の差異

2-5. 反応槽の気液分離特性[13]

2-5-1. はじめに

本章では、Al/水反応推進系の構成要素の一つである反応槽につき、微小重力環境下での反応槽内部の水、アルミ合金微粉末、水素気泡、空気泡の流動挙動の観察結果について述べる。

2-5-2. 実験概要

直径 50 mm, 高さ 60 mm の円筒容器内に純水およびアルミ合金微粒子を注入して攪拌子（マグネチックスターラー）にて攪拌し、通常重力および微小重力環境下での純水、空気相、水素気泡およびアルミ合金粉末の挙動をビデオカメラで収録した。表 3 に実験条件を示す。なお本実験においても微小重力環境の生成には、(株)植松電機の微小重力実験塔「COSMOTORRE」を利用した。

表 3 実験条件

Liquid amount	60, 80, 100 ml
Aluminum alloy sample	Al - 30[wt%] Sn
Mass of sample	1.0 g
Size of sample	100-150 μ m, <53 μ m
Rotational speed of stirrer	0, 180rpm

2-5-3. 実験結果

図 10 に微小重力環境突入時における流動挙動、アルミ合金微粒子挙動を示す。図 10 より攪拌槽が形成する旋回流中に作用する遠心力により、密度の低い空気相が中心軸上に形成されることが分かる。一方、水素気泡は中心軸上に集合するものの、顕著な合体が見られなかった。この原因として、アルミ合金微粒子が気泡の合体を阻害しているものと考えられる。水素気泡の合体促進方法については、今後の課題とする。その他液量、粒子直径、粒子直径の影響および液を円周方向に流入させて旋回流を形成した場合の気液分離状況の観察も行った。

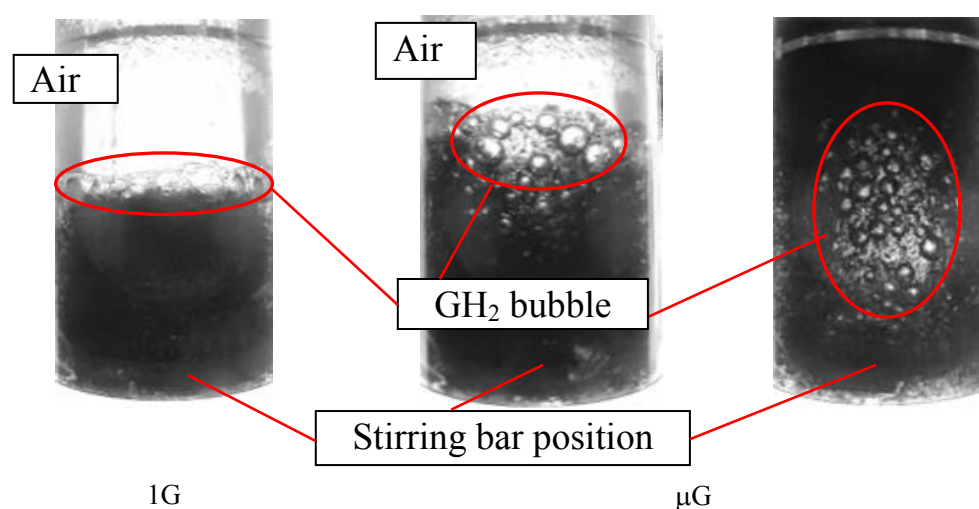


図 10 通常重力および微小重力環境下における反応槽内部の流動挙動

参考文献

- [1] 小野寺英之,今井良二,杉岡正敏,東野和幸 (室蘭工業大学)「Al/水系反応における水素製造制御法の開発」,第 16 回北海道エネルギー資源環境研究発表会,北大,2016 年 1 月 19 日
- [2] 小野寺英之,中田大將, 今井良二, 杉岡正敏, 東野和幸, Al-水系における高圧水素製造の制御法の確立および宇宙機推進系への適用, 日本航空宇宙学会北部支部 2016 年講演会ならびに第 17 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 北大, 2016 年 3 月 9 日～10 日
- [3] Satellite Orbital Decay Calculations, The Australian Space Weather Agency,
<http://www.sws.bom.gov.au/Category/Educational/Space%20Weather/Space%20Weather%20Effects/SatelliteOrbitalDecayCalculations.pdf>
- [4] 小野寺英之, 杉岡正敏, 今井良二, 東野和幸, 増田井出夫, アルミ-水反応の衛星推進系への応用, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会要旨集, IJ11, 2014 年 11 月 12-14 日, 長崎市.
- [5] 東野和幸, 大堀英雄, 小野寺英之, 杉岡正敏, Al/水系反応を利用した水素製造循環に関する研究, 第 15 回北海道エネルギー資源環境研究発表会講演予稿集, pp.11-12, 2015 年 1 月 27 日, 札幌市.
- [6] 大堀英雄, 小野寺英之, 杉岡正敏, 今井良二, 東野和幸, Al/水系反応を利用した水素製造循環に関する研究(その 2), 第 16 回北海道エネルギー資源環境研究発表会要旨集, pp.23-24, 2016 年 1 月 19 日, 札幌市.
- [7] 岩田稔 他, 窒化アルミニウムに関する研究, 無機材質研究所研究報告書第 4 号, (1973), pp.9-10.
- [8] 江良皓, [窒化物の合成と物性]AIN の合成と物性, 応用物理第 42 巻第 12 号, (1973), pp.1222(64)-1225(67).
- [9] 後藤翔, 今村卓哉, 今井良二, 杉岡正敏, 東野和幸, Al/水反応推進系における水タンク内液体マネジメント技術に関する研究, 日本航空宇宙学会北部支部 2016 年講演会ならびに第 17 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 北大, 2016 年 3 月 9 日～10 日
- [10] Dodge, F., “DYNAMIC BEHAVIOR OF LIQUIDS IN MOVING CONTAINERS”, Southwest Research Institute 2000, Chaps. 4.
- [11] N. R. Moore and N. W. Ferraro and A. F. Yue and R. H. Este, “A PROCESS FOR PRODUCING HIGHLY WETTABLE ALUMINUM 6061 SURFACES COMPATIBLE WITH HYDRAZINE”, 54th JANNAF Propulsion Conference (CPIA), (2007), p.4-5
- [12] 今井良二, 出田武臣, 山田啓介(IHI), 濱一守, 三谷健司 (USEF), ベーン式推進タンク内流体挙動の数値解析, 宇宙科学技術連合講演会講演集, (2002), p.287-292
- [13] 斎藤真之, 小野寺英之, 今井良二, 杉岡正敏, 東野和幸, 微小重力環境での Al-水反応における反応器内気液分離に関する研究, 第 13 回 HASTIC 学術講演会, 北大, 2016 年 3 月 9 日